

22.09.2004

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

REC'D 11 NOV 2004

WIPO

PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2004年 7月 9日

出 願 番 号
Application Number: 特願2004-202957
[ST. 10/C]: [JP 2004-202957]

出 願 人
Applicant(s): 日本電信電話株式会社
学校法人北里学園

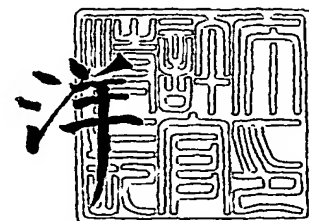
JP 04/14302

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年10月29日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



BEST AVAILABLE COPY

【書類名】 特許願
【整理番号】 NTTH165437
【提出日】 平成16年 7月 9日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01S 3/18
【発明者】
 【住所又は居所】 神奈川県相模原市北里 1-15-1 学校法人北里学園内
 【氏名】 大林 康二
【発明者】
 【住所又は居所】 神奈川県相模原市北里 1-15-1 学校法人北里学園内
 【氏名】 清水 公也
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 宮澤 丈夫
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 吉村 了行
【特許出願人】
 【識別番号】 000004226
 【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社
【特許出願人】
 【識別番号】 598041566
 【氏名又は名称】 学校法人北里学園
【代理人】
 【識別番号】 100078499
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 光石 俊郎
 【電話番号】 03-3583-7058
【選任した代理人】
 【識別番号】 100102945
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 田中 康幸
 【電話番号】 03-3583-7058
【選任した代理人】
 【識別番号】 100120673
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 松元 洋
 【電話番号】 03-3583-7058
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 020318
 【納付金額】 16,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【物件名】 委任状 1
 【提出物件の特記事項】 手続補足書により提出
 【包括委任状番号】 0309079

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

可変波長光発生装置と、
前記可変波長光発生装置の出力光を測定光と参照光に分割する手段と、
前記測定光を測定対象に照射すると共に、前記測定光が前記測定対象によって反射又は散乱された信号光を捕捉する手段と、
前記信号光と前記参照光とを合波する手段と、
前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光発生装置の波数毎に測定する手段と、
前記測定する手段によって前記波数毎に計測された前記出力光の強度の集合から前記測定光が前記測定対象によって後方散乱された位置と後方散乱強度とを前記測定対象の奥行き方向に対して特定する手段とを有するオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置において、

前記可変波長光発生装置が、
波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、
前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とするオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置。

【請求項 2】

前記可変波長光源が、可変波長レーザからなることを特徴とする請求項 1 記載のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置。

【請求項 3】

前記分割する手段と前記合波する手段が、同一の手段であることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置。

【請求項 4】

前記反射又は散乱された信号光を捕捉する手段に代えて、
前記測定光を測定対象に照射する手段と、
前記測定光が前記測定対象によって反射又は散乱された信号光を捕捉する手段とを有することを特徴とする請求項 1～請求項 3 の何れか 1 項に記載のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置。

【請求項 5】

波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、
前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とするオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー用可変波長光発生装置。

【請求項 6】

掃引波数の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、
前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とするオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー用可変波長光発生装置。

【請求項 7】

前記掃引波数の異なる複数の可変波長光源が、波数を離散的に切り替え可能であることを特徴とする請求項 6 記載のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー用可変波長光発生装置。

【請求項 8】

前記発光部が光スイッチを備え、前記光スイッチによって前記出力を合わせて出力することを特徴とする請求項 5～請求項 7 の何れか 1 項に記載のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー用可変波長光発生装置。

【請求項 9】

前記可変波長光源が、可変波長レーザからなることを特徴とする請求項 5～請求項 8 の

何れか 1 項に記載の光学・コヒーレント・トモグラフィー用可変波長光発生装置
。

【請求項 10】

請求項 5～請求項 9 の何れか 1 項に記載の可変波長光発生装置を用いたことを特徴とする光学・コヒーレント・トモグラフィー装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置及びこれに用いる可変波長光発生装置

【技術分野】

【0001】

この発明は、オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置及びこれに用いる可変波長光発生装置に関するものである。即ち、この発明は、生体や塗装面等各種構造物の断層像を光の干渉現象を利用して測定する装置及びその光源として用いる可変波長光発生装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー法（OCT法）は、網膜等の断層像の撮影に有効な光学的な断層撮影法である（非特許文献1）。OCT法は、生体への無侵襲性と高い分解能が注目され、目以外の他の臓器への応用も試みられている（非特許文献1）。この測定法の特徴は、深さ方向の空間分解能が高い点にあり、 $\sim 10\mu\text{m}$ 程度の分解能を有する測定装置が実用化されている。分解能は光源のスペクトル幅で決まるが、実用化されているOCTでは、操作の容易性・信頼性・小型軽量性を考慮して半導体発光素子、具体的には近赤外域スーパーluminescentダイオード（SLD）を用いるのが一般的である。即ち、実用化されたOCT装置の分解能は、SLDのスペクトル幅によって制限されている。OCTの空間分解能は光源のスペクトル幅に反比例するので、分解能を高くするためには光源のスペクトル幅を広くすれば良い。しかし、SLDのスペクトル幅はその発光層等の物理的性質により決まるので、今以上にスペクトル幅を拡大するのは困難である。

【0003】

この限界を乗り越える試みとして、中心波長の異なる複数のSLDを組み合わせて、実質的に広帯域の光源を実現しようという試みが佐藤等によって提案されている（非特許文献2）。

【0004】

【非特許文献1】陳 健培 OPTRONICS（2002），NO7,179

【非特許文献2】応用光学 2003. 2 第7頁～第11頁 佐藤 学

【非特許文献3】応用物理：71巻、第11号、p. 1362、吉國 裕三

【非特許文献4】第28回光学シンポジウム予稿集第39頁～第40頁（2003年6月19日発行）

【特許文献1】特願2003-335207号

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

佐藤等は、（1）発光波長の異なる複数のSLDを合波して構成した光源によれば分解能が向上し、（2）光源の合成によって発生するサイドローブも光源強度、中心波長、波長幅を最適化することによって抑制できると主張している。しかしながら、以下に述べる通り、（1）分解能は必ずしも合成後のスペクトル幅に反比例して狭くはならず、（2）大きなサイドローブが発生し、（3）しかも合成する光源の数が増えるほどサイドローブの振幅が大きくなることを、合成光源に対するOCT信号を解析することによって本願発明者は発見した。

【0006】

図10に佐藤等が提案した光源（以下、合成光源）の概略図を、図11（a）に前記合成光源を用いたOCT装置の一例を示す。式（1）にはこの合成光源5を用いて得られる試料1内部の反射面3からのOCT信号 $F(x)$ を示す。

【数1】

$$F(x) = \sqrt{r_r r_s} \sum_{i=1}^N I_i \exp \left[- \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta Z_i} x \right)^2 \right] \cos(4\pi f_{ci} x / C) \quad \dots (1)$$

【0007】

ここで、 x は参照ミラー 8 とビームスプリッタ 7 との光路長 L_1 と、反射面 3 とビームスプリッタ 7 との光路長 L_2 との差 ($L_1 - L_2$) である。 r_r 及び r_s はそれぞれ参照ミラー 8 及び反射面 3 の光反射率である。 I_i は合成光源 5 の i 番目の光源の積分強度を表す。 C は光速である。合成光源 5 は、図 10 に示す通り中心波長の異なる複数の光源 21、具体的には SLD の出力が光結合器 22 によって合波されたものである。 ΔZ_i は i 番目の光源単独によって得られる OCT 信号の半値全幅であり、 f_{ci} は i 番目の光源の中心周波数である。

【0008】

佐藤等の用いた図 11 (a) に示す OCT 装置は広帯域光源 5 を用い、参照ミラー 8 を速度 v で動かす方法である。

この場合 x は測定する時刻 t と $x = vt$ の関係にあり、式 (1) は時間 t の関数として次式で与えられる。

【数2】

$$F_t(t) = \sqrt{r_r r_s} \sum_{i=1}^N I_i \exp \left[- \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta Z_i} v \right)^2 t^2 \right] \cos \left(\frac{4\pi f_{ci} v}{C} t \right) \quad \dots (2)$$

【0009】

このように実際の計測は時間変化する信号を計測するが、以下では計測される結果として位置情報を示す関数 $F(x)$ について述べる。

尚、図 11 (a) に示す OCT の方法は OCDR (オプティカル・コヒーレント・ドメイン・リフレクメトリー) OCT と呼ぶ。

式 (1) で注視すべき点は、合成光源による OCT 信号は個々の光源による OCT 信号の重ね合わせに過ぎないことである。即ち、上記式 (1) で表される合成光源による OCT 信号は、下記式 (3) で表される i 番目の光源による OCT 信号を重ね合わせたものである。

【数3】

$$I_i \exp \left[- \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta Z_i} x \right)^2 \right] \cos(4\pi f_{ci} x / C) \quad \dots (3)$$

【0010】

それにも拘わらず OCT 信号の半値幅が狭くなったように見えるのは、式 (3) の振動項、

【数4】

$$\cos(4\pi f_{ci} x / C) \quad \dots (4)$$

が、光源毎に少しずつ異なった周波数を持っているため重ね合わせるとビート信号が発生するからである。

【0011】

このビート信号の振幅減少によって式 (3) の包絡線項

【数 5】

$$\exp \left[- \left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta Z_i} x \right)^2 \right] \quad \dots \dots (5)$$

が変調されるため、 $x=0$ の近傍では OCT 信号の幅が狭くなるようにも見える。しかし、実際は $x=0$ より離れるに従いビート信号の振幅が一たん元に戻るためサイドローブ 31 が発生する (図 12)。サイドローブは、個々の光源 21 に発生する包絡線と振動を繰り返すビート信号の積によって発生する。従って、大きなサイドローブ 31 が発生する。

【0012】

以下、この現象を、具体例に基づいて説明する。光源のスペクトルを表すには、波長 λ を用いるより波数 k ($=2\pi/\lambda$) を用いた方が便利である。合成光源は、中心波数が k_1 及び k_2 で同一のスペクトル幅 σ と同一の積分強度 I を持ちスペクトル形状がガウシアン型の光源 1 及び光源 2 によって構成されているとする。従って、合成光源のスペクトル $S(k)$ は以下のように表される。

【数 6】

$$S(k) = \sum_{i=1}^2 I \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma} \exp \left[- \frac{(k-k_i)^2}{\sigma^2} \right] \quad \dots \dots (6)$$

【0013】

ここで、個々の光源の半値半幅 W_f は以下の通りになっている。

【数 7】

$$W_f = \sigma \sqrt{\ln 2} \quad \dots \dots (7)$$

【0014】

ここで、光源 1 と光源 2 の中心波数が半値半幅 W_f の 2 倍離れているとすると合成光源のスペクトル形状 31 は図 13 の様になる。縦軸は個々の光源の積分強度 I で規格化されている。ここでスペクトル 32 及びスペクトル 33 は、それぞれ光源 1 及び光源 2 のスペクトルである。

【0015】

次に、合成光源の OCT 信号 $f(x)$ を、光源 1 及び光源 2 のスペクトル幅 σ と波数を用いて表すと以下ようになる。

【数 8】

$$\begin{aligned} f(x) &= \sqrt{r_r r_s} I \cos(2x k_1) e^{-\sigma^2 x^2} + \sqrt{r_r r_s} I \cos(2x k_2) e^{-\sigma^2 x^2} \\ &= \sqrt{r_r r_s} e^{-\sigma^2 x^2} 2 \cos \left[\frac{k_1 + k_2}{2} 2x \right] \cos \left[(k_1 - k_2) x \right] \quad \dots \dots (8) \end{aligned}$$

【0016】

ここで、

【数 9】

$$\cos \left[\frac{k_1 + k_2}{2} 2x \right] \quad \dots \dots (9)$$

は、 k_1 (又は k_2) と同程度の周期の振動を与える。一方、

【数 10】

$$\cos \left[(k_1 - k_2) x \right] \quad \dots \dots (10)$$

は、上記振動のビートの包絡線を与える。そして、

【数 11】

$$\sqrt{r_r r_s} e^{-\sigma^2 x^2} \quad \dots \dots (11)$$

は、個々の光源の OCT 信号の包絡線を与える。

【0017】

図 14 に、振動項 (9) を除いた合成光源による OCT 信号の包絡線 (右半分) を示す。横軸は x を $1/\sigma$ で規格化したものであり、縦軸は $x=0$ の時の値で規格化してある。包絡線 42 が、上記合成光源によるものである。包絡線 41 は個々の光源の包絡線を、包絡線 43 は光源を 4 つにした場合の包絡線である。尚、光源が 4 つの場合の OCT 信号の式は示さないが、光源が 2 つの場合と同様ビート信号が発生する。

【0018】

この図からは、OCT 信号の半値幅は確かに光源の数を増やすと減少していくが、その減り方は光源の数に反比例していないことが分かる。即ち、合成光源のスペクトル幅の増加に反比例しては半値幅が減少しない。具体的には、光源が二つの場合の半値幅は光源が 1 つの場合の 0.62 倍、4 つの場合は 0.33 倍にしかならず、分解能がスペクトル幅に反比例する場合に期待される 0.5 倍及び 0.25 倍にはなっていない。一方、同図には、零を挟んで大きく上下に振動するサイドローブが観察される (OCT 信号が負の値にまで亘るのは、式 (8) が干渉成分のみを表しそのバックグラウンドとなる参照光と信号光の強度を省略してあるからである。)。そして、サイドローブの振幅は光源が 2 つの場合より、4 つの場合の方が明らかに大きい。

【0019】

即ち、合成光源の OCT 信号形状は個々の光源のスペクトル幅によって決定される包絡線 41 に拘束されており、一見すると OCT 信号の幅が狭くなったように見えてもその狭窄化の程度は緩慢である一方、大きなサイドローブが発生する。従って、合成光源を用いても、実は OCT 像の解像度はあまり改善されないという問題点がある。

従って、本発明はオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置において OCT 信号の分解能を向上させ、サイドローブの増大を防止することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0020】

上記課題を解決する第 1 発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置は、可変波長光発生装置と、

前記可変波長光発生装置の出力光を測定光と参照光に分割する手段と、

前記測定光を測定対象に照射すると共に、前記測定光が前記測定対象によって反射又は散乱された信号光を捕捉する手段と、

前記信号光と前記参照光とを合波する手段と、

前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光発生装置の波数毎に測定する手段と、

前記測定する手段によって前記波数毎に計測された前記出力光の強度の集合から前記測定光が前記測定対象によって後方散乱された位置と後方散乱強度とを前記測定対象の奥行き方向に対して特定する手段とを有するオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置において、

前記可変波長光発生装置が、
波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、
前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とする。

【0021】

また、第2発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置は、第1発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置において、前記可変波長光源が、可変波長レーザからなることを特徴とする。

【0022】

また、第3発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置は、第1発明又は第2発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置において、前記分割する手段と前記合波する手段が、同一の手段であることを特徴とする。

【0023】

また、第4発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置は、第1発明～第3発明の何れかのオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置において、

前記反射又は散乱された信号光を捕捉する手段に代えて、

前記測定光を測定対象に照射する手段と、

前記測定光が前記測定対象によって反射又は散乱された信号光を捕捉する手段とを有することを特徴とする。

【0024】

また、第5発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、

前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とする。

【0025】

また、第6発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、掃引波数の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、

前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引を可能にする制御装置とを有してなることを特徴とする。

【0026】

また、第7発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、第6発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置において、

前記掃引波数の異なる複数の可変波長光源が、波数を離散的に切り替え可能であることを特徴とする。

【0027】

また、第8発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、第5発明～第7発明の何れかのオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置において、

前記発光部が光スイッチを備え、前記光スイッチによって前記出力を合わせて出力することを特徴とする。

【0028】

また、第9発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、第5発明～第8発明の何れかのオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置において、

前記可変波長光源が、可変波長レーザからなることを特徴とする。

【0029】

また、第10発明のオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置用可変波長光発生装置は、第5発明～第9発明の何れかの可変波長光発生装置を用いたことを特徴とするオプティカル・コヒーレント・トモグラフィ装置。

【発明の効果】

【0030】

本発明は、可変波長光源を組み合わせた新規なスイッチ光源と、OFDR-OCT装置とを組み合わせたものであり、この新規なスイッチ光源によれば合成光源とは異なり複数の光源を用いることによって拡大した光スペクトル幅に反比例してOCT信号の分解能が向上するという効果が奏される。また、合成光源に見られるような合波によるサイドローブの増大という問題も発生しない。

【発明を実施するための最良の形態】

【0031】

(上記課題の原因)

実際のOCDR-OCT測定では、参照ミラーを、速度 v で動かす。このとき、観測位置は $x = vt$ の関係で時間の関数となり、信号は式(2)の $F_t(t)$ で表される。この信号を構成する i 番目の成分は、周波数が

【数12】

$$\frac{2f_{ci}v}{C} \dots\dots\dots (12)$$

で振動し、その包絡線が次式のガウス型の時間依存性で与えられる。

【数13】

$$\exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta Z_i}\right)^2 (vt)^2\right] \dots\dots\dots (13)$$

【0032】

このように時間変化する信号 $F_t(t)$ から、包絡線の信号(13)を抽出し $vt = x$ と置き直して位置 x の関数としての反射率の位置信号を得る信号処理においては、(12)式の全ての周波数を丁度通過させるバンド・パス・フィルターを通して余分な信号を除去し、これを二乗検波し、さらにロー・パス・フィルターを用いて(13)式の包絡線情報のみを求める。

【0033】

OCTで計測される奥行き方向の信号を位置 x の関数として示すと、対数スケールでは信号に付随して、サイドローブが現れ、信号位置から離れた位置でもノイズフロアーが観測される。このサイドローブとノイズフロアーを出来るだけ小さくするために、OCDR-OCTの光源は出来るだけガウシアンに近いスペクトル形状の広帯域光源が望ましい。合成光源を用い帯域幅を広げる場合も、合成光源のスペクトル形状はガウシアンが望ましい。

【0034】

OCDR-OCTの合成光源を得るために非特許文献2では、図10に示すような、複数の中心波長の異なるガウシアンの光源の和を作っている。この場合の光源のスペクトルは、式(6)に示すような複数の山からなる多峰性のスペクトル形状になり、単峰のガウシアンでないため、サイドローブが増大して現れてしまう。これは波長帯幅拡張のために合成光源を用いるOCDR-OCT法では避けられない問題である。

【0035】

(本発明の原理)

本発明は、合成光源に関する上記考案に基づいてなされたものである。本発明は、複数の光源を組み合わせてスペクトル幅を拡大する点は合成光源と共通するが、組み合わせ後各々の光源は同時には用いず時系列的にそれぞれの光源を順次使用するようにした点で合成光源とは相違する。このような光源(以後、「スイッチ光源」と呼ぶ)を用いる場合には、OCT信号の幅と光源のスペクトル幅の関係は単一光源を用いる場合となんら変わらず

、従って組み合わせる光源の数が増えてスペクトル幅が広がれば広がるほど単一光源の場合と同様に組合せ後のスペクトル幅に反比例してOCT信号の幅が狭くなる。しかも、合成に伴うサイドロープの増大という問題も生じない。

【0036】

このような光源を実現するため、本発明によるOCT装置では、合成光源が用いられるOCDR-OCT法ではなく本願発明者等が発明したOFDR-OCT法(Optical Frequency Domain Reflectometry法)を選択し、可変掃引波長範囲の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する様に構成した光源を用いて、各可変波長光源の波長掃引を一つずつ行っていく。使用する可変波長光源が切り替わっても、任意の波数における測定光の強度を可変波長光源を制御することによって任意に設定できる点では可変波長光源の数が一つの場合と何ら変わりはないのでスイッチ光源のスペクトル形状は可変波長光源が一つの場合でも複数の場合でも本質的な相違はない(ここで言う光のスペクトルはスイッチ光源の波数掃引によって得られるスペクトルであり、合成光源のスペクトルのように同時に射出される光を波長を分解して得られるスペクトルとは異なる)。従って、スイッチ光源によれば形状は光源が一つの場合と同じで波数幅の広がったスペクトルを容易に実現できる。従って、広帯域化しても分解能は波数幅に反比例して狭くなりしかもサイドロープの増大という問題も発生しない。

【0037】

ここでOFDR-OCT法について、少し詳しく説明する。

OFDR-OCT法では、試料に一時に照射する光は単一波数成分によって構成されており、この波数を走査することによって得られる干渉信号をフーリエ変換することによってOCT信号を合成する(非特許文献4)。正確には、干渉信号に対するフーリエ余弦変換の自乗とフーリエ正弦変換の自乗との和(又はその平方根)をとる。

【0038】

図11(b)に、OFDR-OCT法の概念図を示す。図11(a)に示すOCDR-OCT法との違いは、図11(a)では光源が広帯域光源5であるのに対し、図11(b)では波長が可変な極めて狭帯域の光源131であり、また、図11(a)では参照ミラー8を速さvで動かすのに対し、図11(b)では参照ミラー8は固定されている。

【0039】

図11(b)において光源の波数が k_1 のとき観測される1つの反射面3からの信号は次式で与えられる。

【数14】

$$P_i(x) = I_0 [r_r^2 + r_s^2 + 2\sqrt{r_r r_s} \cos(2k_i x)] \quad \dots \dots (14)$$

【0040】

ここで、 I_0 は光源の強度で、波数が変化しても一定とする。差動検出を行うと、右辺[]内の第1項と第2項の直流成分は打ち消せるので、検出する信号は干渉項のみとなり、次式になる。

【数15】

$$P_i'(x) = 2\sqrt{r_r r_s} I_0 \cos(2k_i x) \quad \dots \dots (15)$$

【0041】

試料が連続的な場合は、反射面は連続的に分布するので、試料全体からの波数 k_i のときの反射光の干渉項の強度 P_i は、 x について積分して、次式となる。

【数 16】

$$P_i = 2\sqrt{r_r r_s} I_0 \int \cos(2k_i x') dx' \quad \dots \dots (16)$$

【0042】

波数 k_i が等間隔で $i = 1$ から N まで走査されるものとし、試料の奥行き方向の位置 x における反射率に比例する信号 $R(x)$ は、次式の離散的なフーリエ変換で求められる。

【数 17】

$$R(x)^2 = \left[\sum_{i=1}^N P_i \cos(2k_i x) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N P_i \sin(2k_i x) \right]^2 \quad \dots \dots (17)$$

【0043】

スイッチ光源にしてスペクトルを広げると、走査する波数の数 N が増し、スペクトルの分解能が増し、サイドローブは減少する。

スイッチ光源の出力光のスペクトルの一例を図 4 に、この様な光源を用いて得られた OCT 信号の一例を図 5 に示す（このグラフは、フーリエ余弦変換の自乗とフーリエ正弦変換の自乗との和に対するものである。）。

【0044】

図 4 は矩形のスペクトル形状を持つ可変波長光源を、二つ組み合わせた場合が記載されている。図 5 の縦軸は、 $x = 0$ の時の値で規格化してある。横軸は、スペクトルの半値半幅 $W_k/2$ の逆数で規格化してある。A は可変波長光源が 1 つの場合、B の可変波長光源が 2 つの場合、C は可変波長光源が 4 つの場合である（各光源のスペクトル半値幅、強度は同一と仮定し、掃引する波数の全総数は光源の数に比例するとした。）。OCT ピークの半値半幅は、光源の数に反比例して 0.695、0.348、0.174 と小さくなっていく。光源のスペクトル形状が矩形であるため、サイドローブが発生しているが、合成光源によるものよりは明らかに小さくしかも光源の数が増えても大きくならない。尚、サイドローブの大きさは x の増加と共に小さくなり、その最大値は掃引する可変波長光源の数を増やしても変わらない。

【0045】

更に、この様なフーリエ変換によるサイドローブは、適当な窓関数を干渉信号に掛けてからフーリエ変換することによって取り除くことができる。図 6 には、ガウシアン窓を用いた場合の結果を示す。A は窓関数を掛けない場合の OCT 信号であり、B はガウシアン窓関数を掛けた場合の結果である。小さなサイドローブも確認できるように、縦軸は LOG 表示とした。尚、横軸は任意単位とした。ガウシアン窓を用いることによって、サイドローブは -60 dB 近く減少している。パラメータを適当に選べば、サイドローブを更に減少させることもできる。

【0046】

また、スイッチ光源を用いた OFDR-OCT の利点は、数値解析によって、各光源の各波数における強度の変動を補正することが出来る点にある。幅広いスペクトルのスイッチ光源を実際に作成した場合、全ての波数で強度一定を実現することは難しく、むしろ強度は波数の関数として変動することの方が多であろう。光源強度の各波数における強度を測定時に計測するか、または、再現性がよければあらかじめ補正値を求めておき、各測定値 P_i に補正係数 C_i を乗じれば、一定の強度の光源を用いて測定したことに相当するものとするれば、窓関数 W_i を取り入れた離散的フーリエ変換は、式 (17) に対応するものとして、次式となる。

【数 18】

$$R(x)^2 = \left[\sum_{i=1}^N W_i P_i C_i \cos(2k_i x) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N W_i P_i C_i \sin(2k_i x) \right]^2 \quad \cdot \cdot (18)$$

【0047】

窓関数を用いることは、実効的には、光源のスペクトル形状を窓関数の型にすることに対応する。補正係数 C_i を乗ずることは、実効的な光源のスペクトルを、出来るだけ近似よく設定したい窓関数の形状に近づけることに対応する。このように、OFDR-OCT の利点は、スイッチ光源の場合も、数値計算において、全体の実効的な光源スペクトル形状を、望ましい関数型に設定できる点にもある。

【0048】

尚、図 4 には可変波長光源のスペクトルが隣接した場合が記載されているが、間隔が開いていてもかまわない。この場合に得られる OCT 信号は、間隔が開いていない場合に得られる OCT 信号から、上記開いている間隔に存在する全波数を使って得られる OCT 信号を差し引いたものになる。従って、この間隔が広すぎない限り、差し引くべき OCT 信号はブロードな小さなピークなので、信号の変形は僅かなものである。

【0049】

また、上記第 6 発明において、出力可能波数を互いに補うように波数掃引を可能にするとは、図 7 のように、波数範囲を広げるようにする場合も考えられるし、図 9 のように、2 つの光源の波数間隔が同じものを、互いの波数を少しずらして 2 つの光源を合わせ、結果的に波数間隔を狭くした一つの光源として考えられるようにする場合もある。

【0050】

可変波長光源が、波数を離散的に切り替え可能である場合の、波数の走査法の例を、図 7 ～ 図 9 に示す。

【0051】

図 7 の場合、個々の波数掃引範囲の幅が限定されているとき、波数範囲が丁度隣接する 2 つの離散的な可変波長光源を順次走査し、走査範囲を広げる場合が示してある。波数範囲を広げることによって、OCT 測定 of 分解能を向上させることができる。

【0052】

図 8 は、波数の走査が必ずしも漸増又は漸減である必要はなく、不規則に走査しても、測定時間内に所定の波数を全て走査できさえすればよいことを示している。ここで「所定の波数」とは、＜等間隔で並んだ波数の集合＞であることが望ましいが、必ずしもこれに限られるものではなく、波数間隔が一定でない波数の集合であってもよい。波数間隔が一定でない場合は、断層像構築のための計算処理において、それを考慮すればよい。不規則に走査が出来ることによって、ある 1 つの光源では出射できない波長を、他の光源で出射して、所定の波数を得ることが出来る。

【0053】

図 9 は、2 つの光源の波数の走査が、互いに波数間隔を補完する場合が示してある。波数間隔の逆数が、試料の測定距離に比例する。1 つの光源では最小の波数間隔が制限されているが、別の光源で同じ波数間隔でも、波数領域を丁度補完できる場合、図 9 に示す走査によって、波数間隔を縮め、測定可能な試料の深さを増すことができる。

【0054】

＜実施の形態例＞

図 1 に、本発明によるオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の一例を示す。また、図 2 には前記オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の光源として用いる可変波長光発生装置の構成を示し、図 3 には前記可変波長光発生装置の他の構成を示す。

【0055】

図 1 に示すオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置では、その光源（可変波

長光発生装置)としてスイッチ光源131を用いている。スイッチ光源131は、図2に示すように波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源41の出力を合わせて出力するように構成された発光部43と、各可変波長光源41を順次掃引することによって個々の可変波長光源の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置44とからなる。尚、波数掃引は、一方向の掃引には限らず、例えば不規則に波数を選択し最終的に全波数範囲を選択するものであっても良い。

【0056】

スイッチ光源131は、図2の光結合器42に代えて図3の様に光スイッチ45を用いても良い。異なる波長の光を光結合器を用いて結合しようとする、結合損失が起きやすい。しかし、光スイッチ特に機械式のものをを用いれば結合損失は原理的にはなくすることができる。この場合、制御装置44は波数掃引中の可変波長光源42が出力側に接続される様に光スイッチ45を制御する。また、スイッチ光源特に発光部43のモノリシック化は可能である。

【0057】

可変波長光源41は、例えば超周期構造回折格子分布反射半導体レーザ(非特許文献3)を用いることができる。可変波長範囲(簡単のため、波長で表現する)としては、例えば1450nm~1490nm、1490nm~1530nm、1530nm~1570nm、1570nm~1610nmの4つの可変波長光源42を用いる。この波長範囲で、波数間隔を等間隔として1600波数の走査を行う。

【0058】

スイッチ光源131から出射された光は、第一のカプラ133によって70:30の割合で2分割される。そして、ここで分割された光の一方(分割割合70%)は測定光として、オプティカルサーキュレーター134を介して測定対象137に導かれる。測定対象137によって後方散乱された信号光145は再び光ファイバ147に入射し、オプティカルサーキュレーター134によって第二のカプラ138に導かれる。信号光は第二のカプラ138によって、第一のカプラ133で分割された他方の光(参照光)と合波される。オプティカルサーキュレーター134を利用することによって、マッハツェンダー型の干渉計を構築することができる。尚、光ファイバ147から出力する測定光は、レンズ135によって細い平行ビームに整形してから測定対象137に照射する。

【0059】

以上の例では、マッハツェンダー型の干渉計を用いているが、マイケルソン干渉計(図11(b))を用いることもできる。この場合には、可変波長光源131から出射される光を分割する手段と信号光と参照光を合波する手段は同一のもの(例えば、ビームスプリッタ7)となる。更に、測定対象に測定光を照射する手段とその反射光を捕捉する手段が同一の場合を例示したが、これらは別々であって良い。例えば、オプティカルサーキュレーター134から走査ミラー136までの光学装置に代え、先端にレンズを備え平行ビームを出射できるようにした光ファイバAを第一のカプラ133に接続すると共に、第二のカプラ138に光ファイバAと同じ構造で光ファイバAに平行に密着させた光ファイバB(レンズ同士も密着させる)を接続しても良い。

【0060】

断層像を得るためのBスキャンは、光ファイバ147と測定対象137との間に介在させた走査ミラー136によって測定光を測定対象137の表面で一直線に走査することによって実現される。波数の走査はAスキャンと称する。尚、第一、及び第二のカプラ133、138は、方向性結合器によって構成されている。

第二のカプラ138の出力は、光検出機能を有する差動アンプ139で検出される。この検出によって式(14)における直流成分が除かれる。

差動アンプ139の出力は、アナログ/デジタル変換機(図示せず)に入力され、そのデジタル出力は計算機141に導かれ、計算機141で計算処理されてコヒーレント干渉波形すなわち後方散乱強度分布を合成する(特許文献1、非特許文献4)。尚、上記計算機141は、スイッチ光源131の制御装置44に対する波数掃引などの制御命令も行う

【0061】

この様なOFDR-OCT装置によれば、干渉光をフーリエ変換して得られるOCT信号 $R(x)$ の半値全幅は次式で表されるので、波数掃引範囲 $1450\text{ nm} \sim 1610\text{ nm}$ のスイッチ光源を用いることによって生体内（屈折率 1.38 ）の分解能 $6.4\text{ }\mu\text{m}$ を実現できる。更に、可変波長光源の数を増やした波数掃引範囲 $1.30\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ のスイッチ光源を用いることによって生体内（屈折率 1.38 ）の分解能 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ を実現できる。

【数19】

$$\frac{3.79}{W_k} \dots\dots\dots (19)$$

【0062】

分解能は、 $R(x)$ 信号より $R(x)^2$ の方が優れている。 $R(x)^2$ を信号として用いた場合の半値全幅は

【数20】

$$\frac{2.78}{W_k} \dots\dots\dots (20)$$

となるので、生体中の分解能は、波数掃引範囲 $1450\text{ nm} \sim 1610\text{ nm}$ のスイッチ光源を用いると $4.7\text{ }\mu\text{m}$ 、波数掃引範囲 $1.30\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ のスイッチ光源を用いると $2.2\text{ }\mu\text{m}$ を実現できる。詳しくは、波長範囲 $1.57\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ の単一光源では生体中の半値幅が $20\text{ }\mu\text{m}$ 、2つの光源を合成した場合（波長範囲 $1.53\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ ）には $9.8\text{ }\mu\text{m}$ 、4つの光源を合成した場合（波長範囲 $1.45 \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ ）には $4.7\text{ }\mu\text{m}$ 、8つの光源を合成した場合（波長範囲 $1.30\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ ）には $2.2\text{ }\mu\text{m}$ である。サイドローブの大きさは、光源の数には関係なくメインピークの大きさの 0.047 倍である。

【0063】

一方、合成光源（中心波長のみが異なる広帯域光源を合成したもの）では、波長範囲 $1.57\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ の単一の広帯域光源では生体中の半値幅が $20\text{ }\mu\text{m}$ 、2つの光源を合成した場合（波長範囲 $1.53\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ ）には $13\text{ }\mu\text{m}$ 、4つの光源を合成した場合（波長範囲 $1.46\text{ }\mu\text{m} \sim 1.61\text{ }\mu\text{m}$ ）には $6.7\text{ }\mu\text{m}$ である。サイドローブの大きさは、4つの光源を合成した場合でメインピークの大きさに対して 0.27 倍となる。

【図面の簡単な説明】

【0064】

【図1】本発明の実施の形態例に係るオプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の構成図である。

【図2】前記オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の光源として用いる可変波長光発生装置の構成を示す図である。

【図3】前記オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の光源として用いる可変波長光発生装置の他の構成を示す図である。

【図4】本発明のスイッチ光源（可変波長光発生装置）のスペクトルの一例を示す図である。

【図5】前記スイッチ光源を用いて得られたOCT信号の一例を示す図である。

【図6】ガウシアン窓を用いた場合のOCT信号の結果を示す図である。

【図7】本発明のスイッチ光源（可変波長光発生装置）において個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引をする場合の例を示す図である。

【図 8】本発明のスイッチ光源（可変波長光発生装置）において個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引をする場合の他の例を示す図である。

【図 9】本発明のスイッチ光源（可変波長光発生装置）において個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引をする場合の他の例を示す図である。

【図 10】従来の合成光源の概略構成を示す図である。

【図 11】（a）は前記合成光源を用いた OCT 装置の例を示す図、（b）は波長が可変な極めて狭帯域の光源を用いた OCT 装置の例を示す図である。

【図 12】従来の合成光源を用いた場合の OCT 信号強度（サイドロープの発生）を示す図である。

【図 13】従来の合成光源のスペクトル形状を示す図である。

【図 14】振動項を除いた従来の合成光源による OCT 信号の包絡線（右半分）を示す図である。

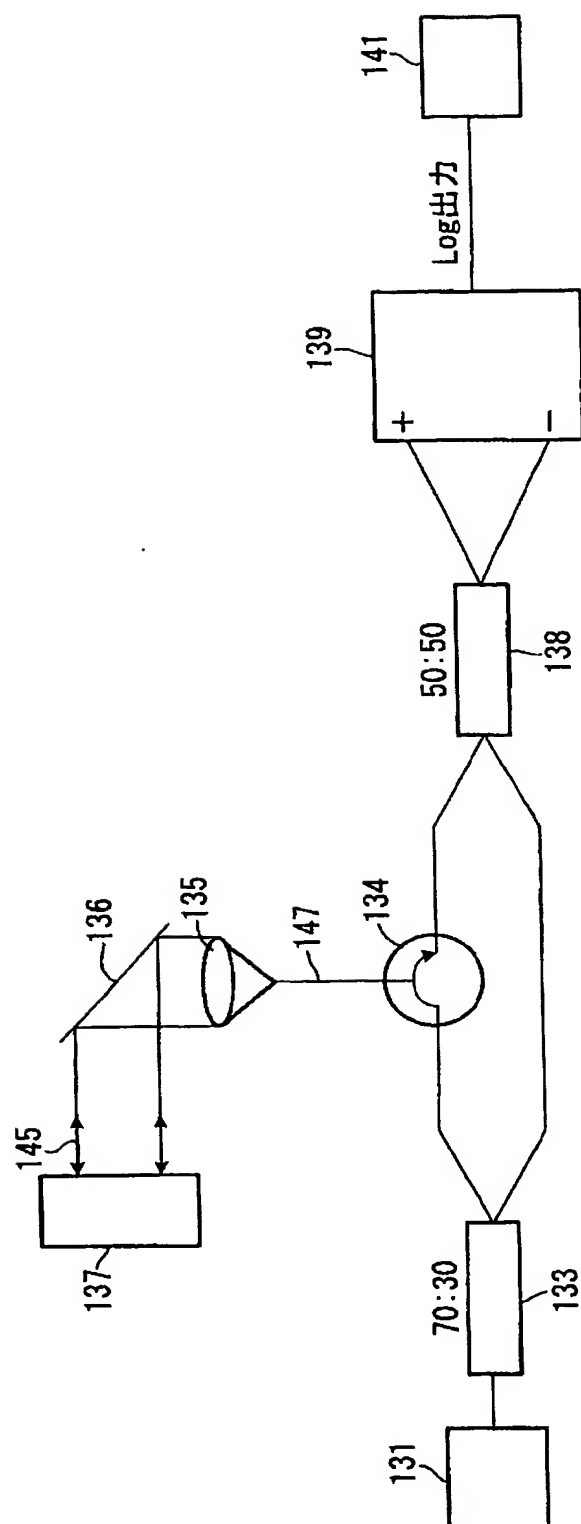
【符号の説明】

【0065】

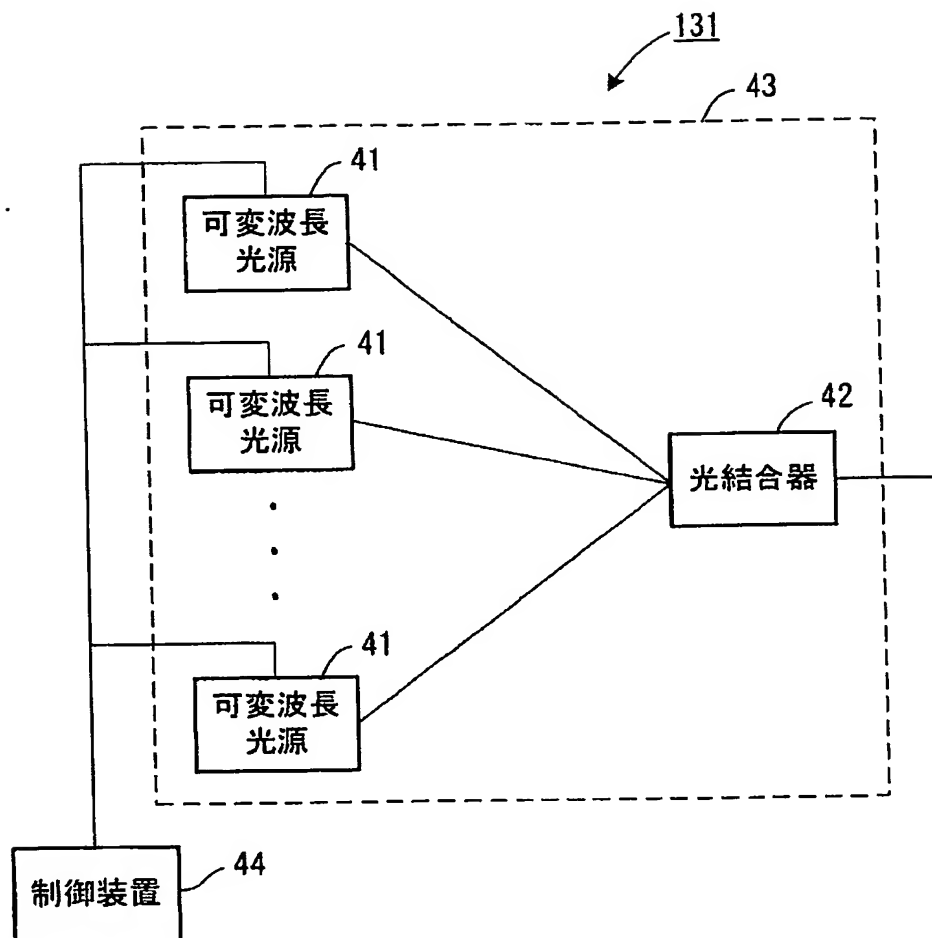
- 1 試料
- 3 反射面
- 5 合成光源
- 7 ビームスプリッタ
- 8 参照ミラー
- 9 光検出器
- 10 参照光
- 11 信号光
- 21 光源
- 22 光結合器
- 41 可変波長光源
- 42 光結合器
- 43 発光部
- 44 制御装置
- 45 光スイッチ
- 131 スwitch光源（可変波長光発生装置）
- 133 第一のカプラ
- 134 オプティカルサーキュレーター
- 135 レンズ
- 136 走査ミラー
- 137 測定対象
- 138 第二のカプラ
- 139 差動アンプ
- 141 計算機
- 145 信号光
- 147 光ファイバ

【書類名】 図面
【図 1】 :

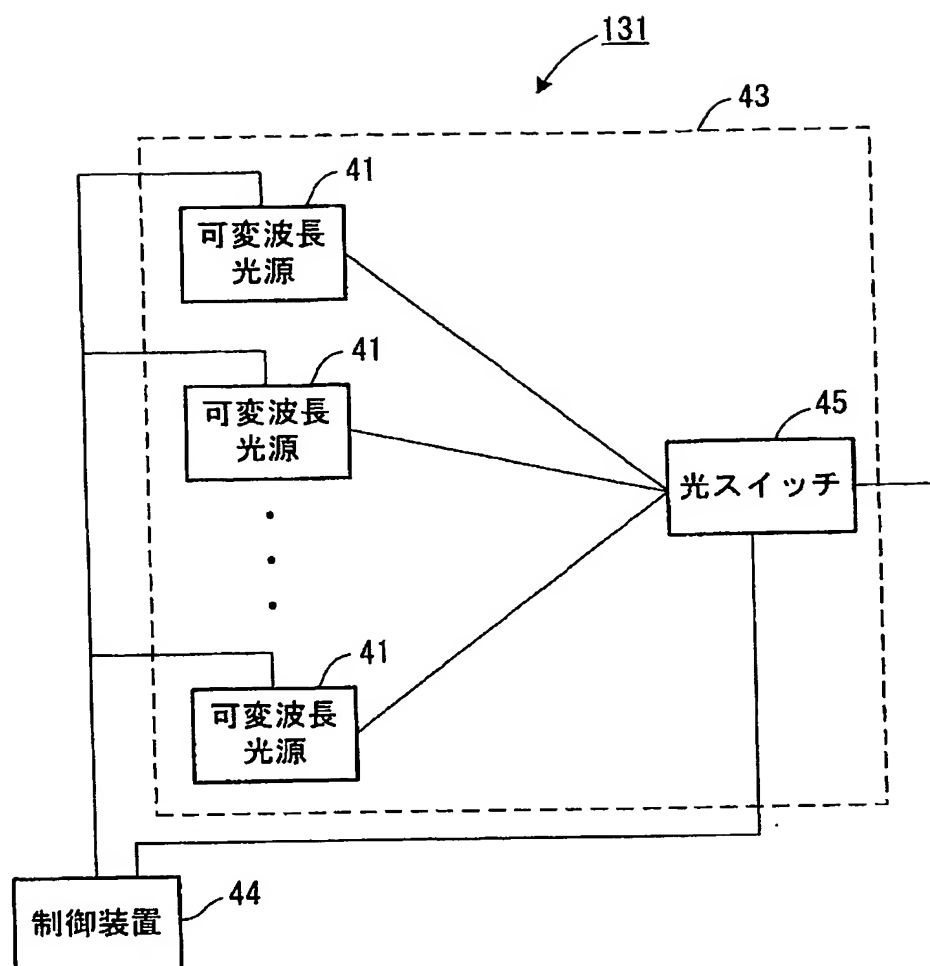
【図 1】 :



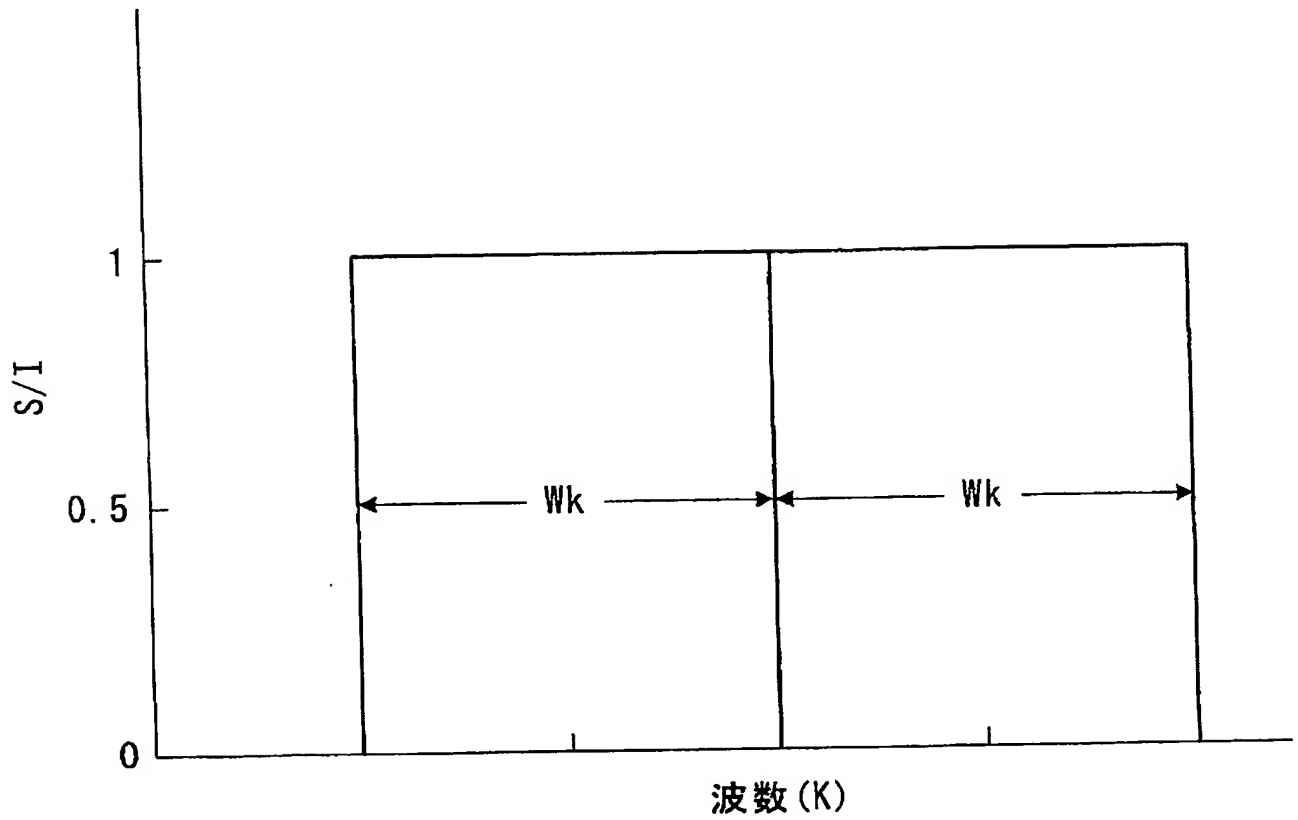
【図 2】



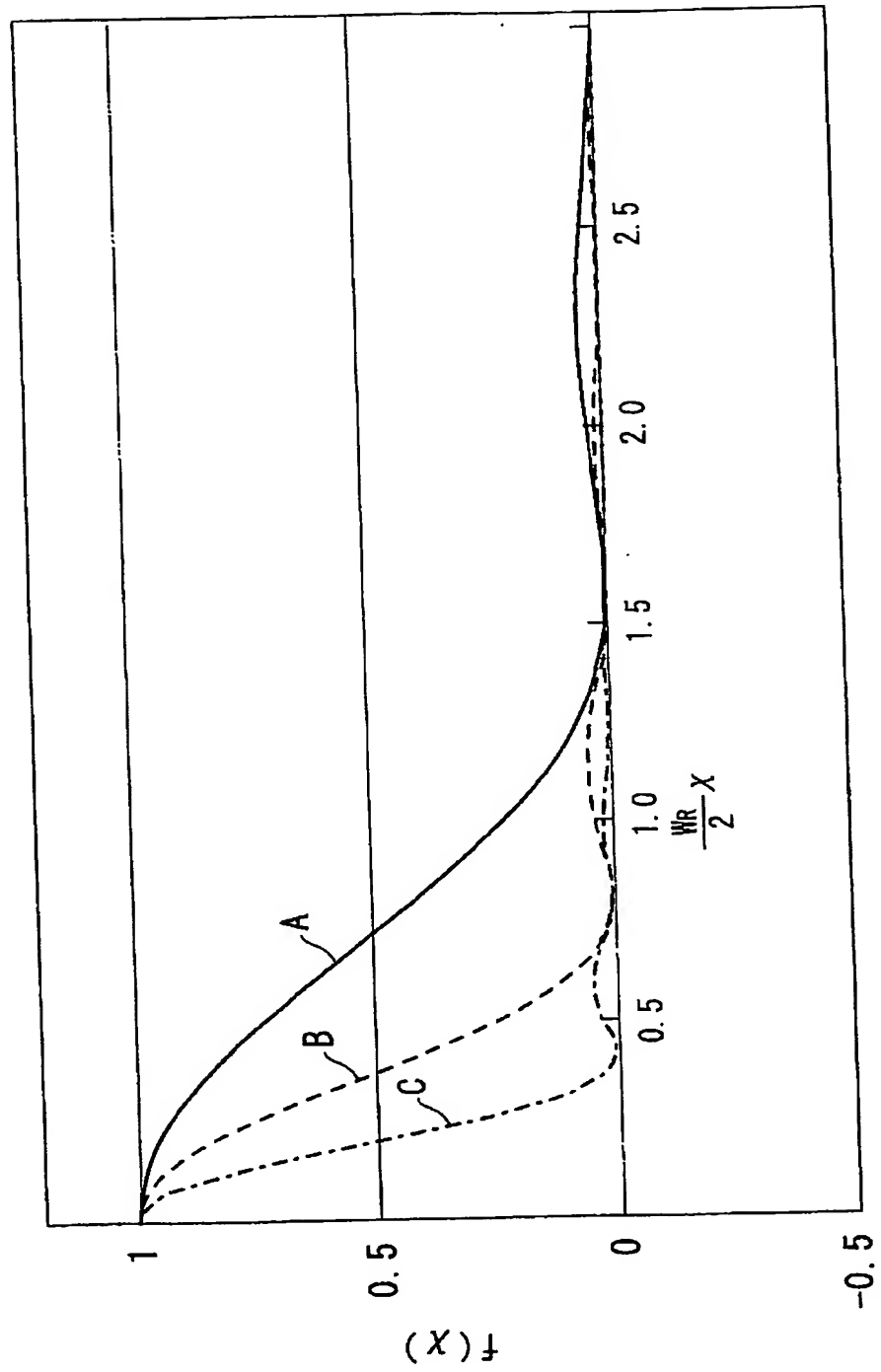
【図 3】



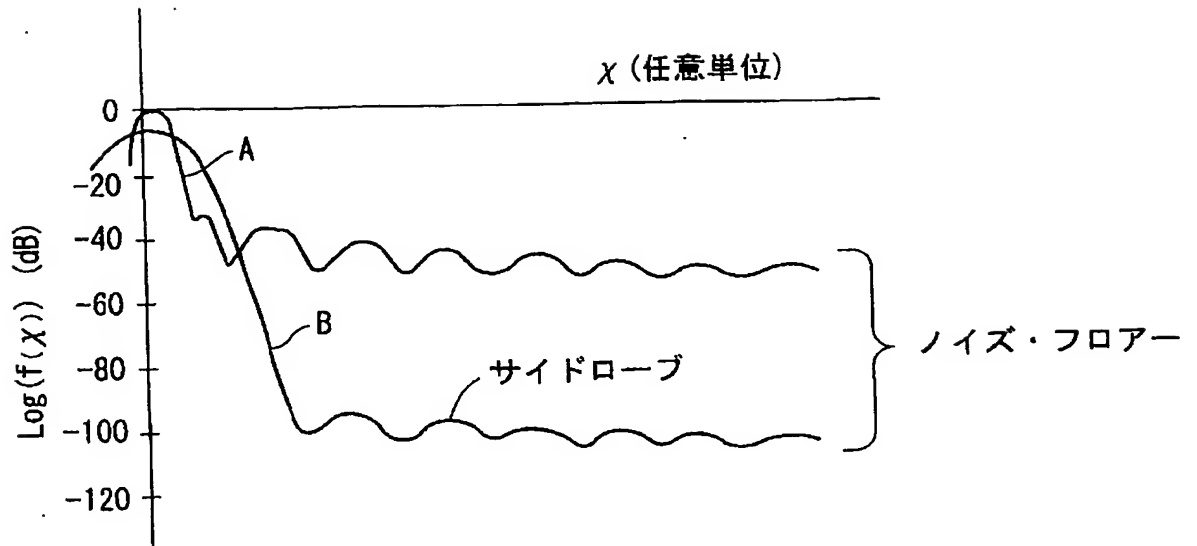
【図 4】



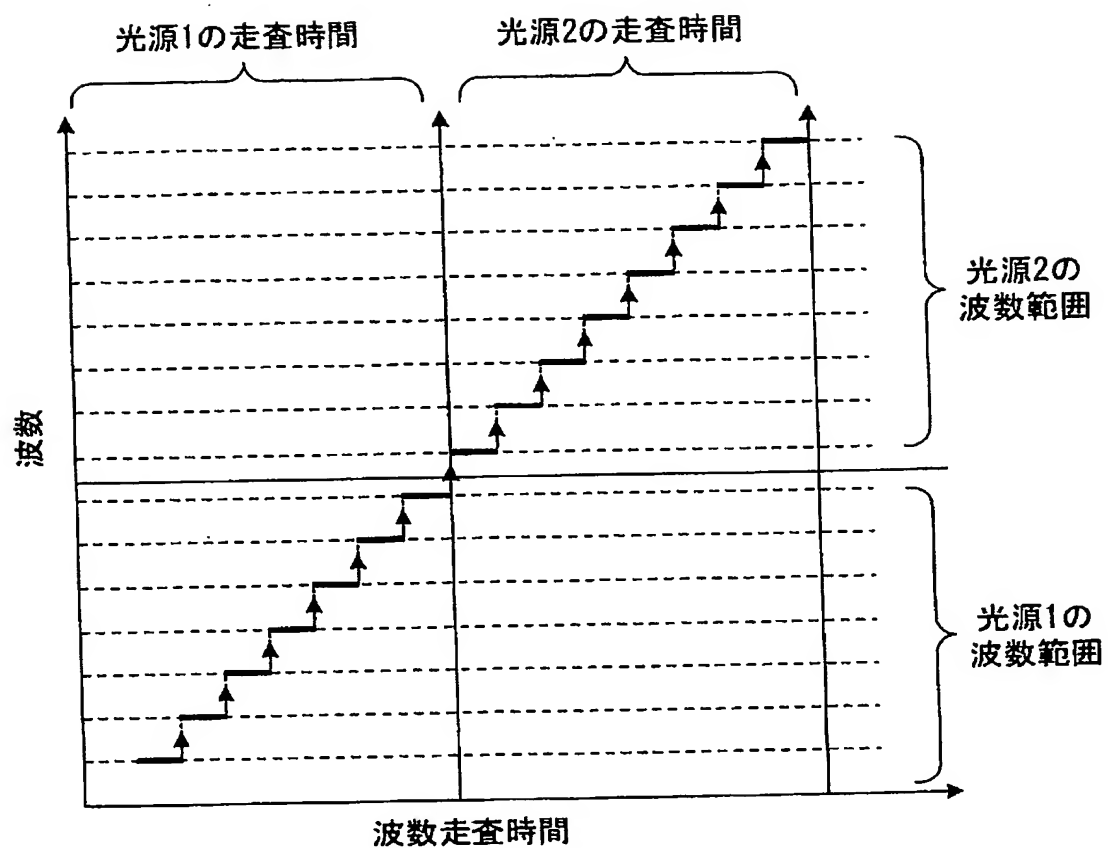
【図 5】



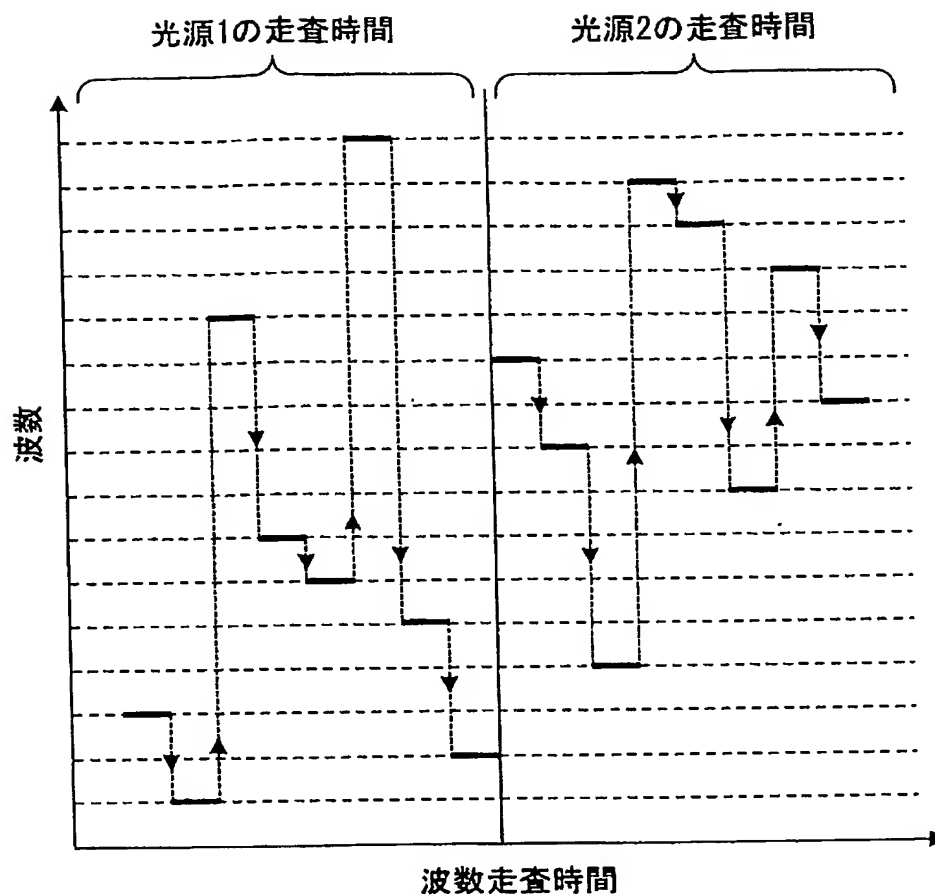
【図 6】



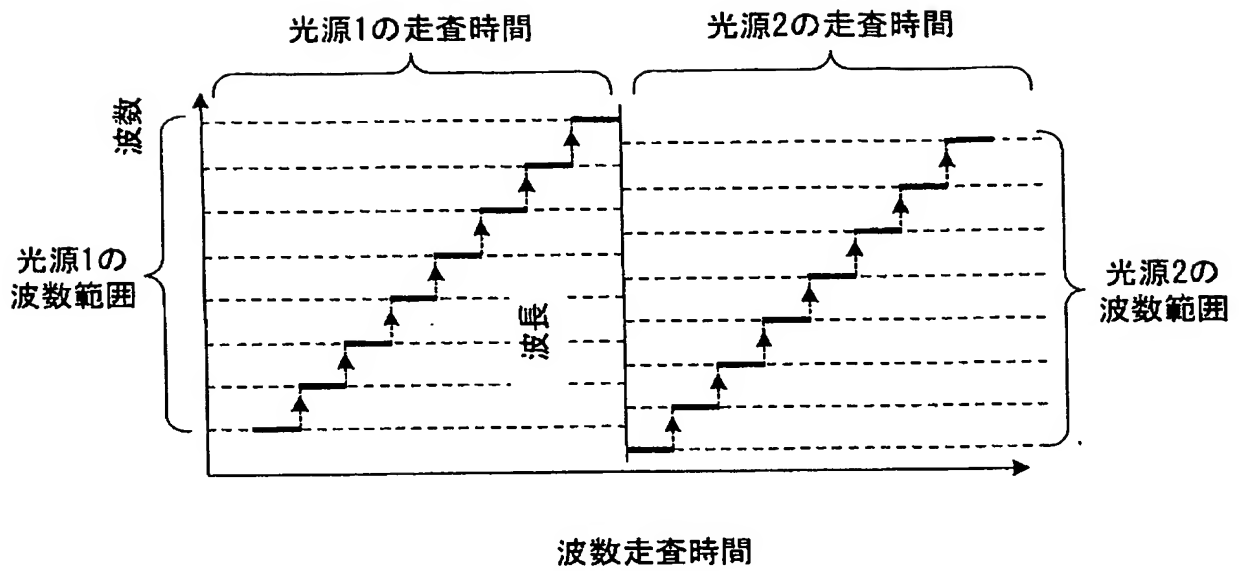
【図 7】



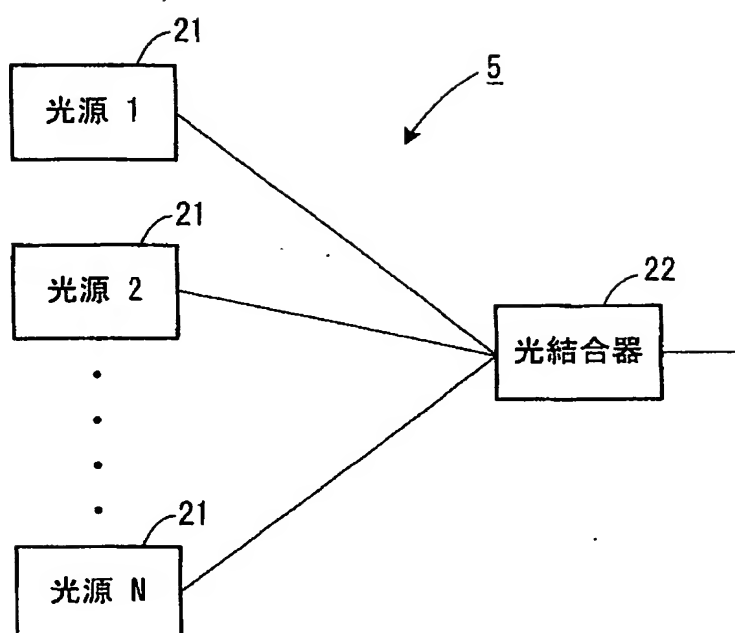
【図 8】



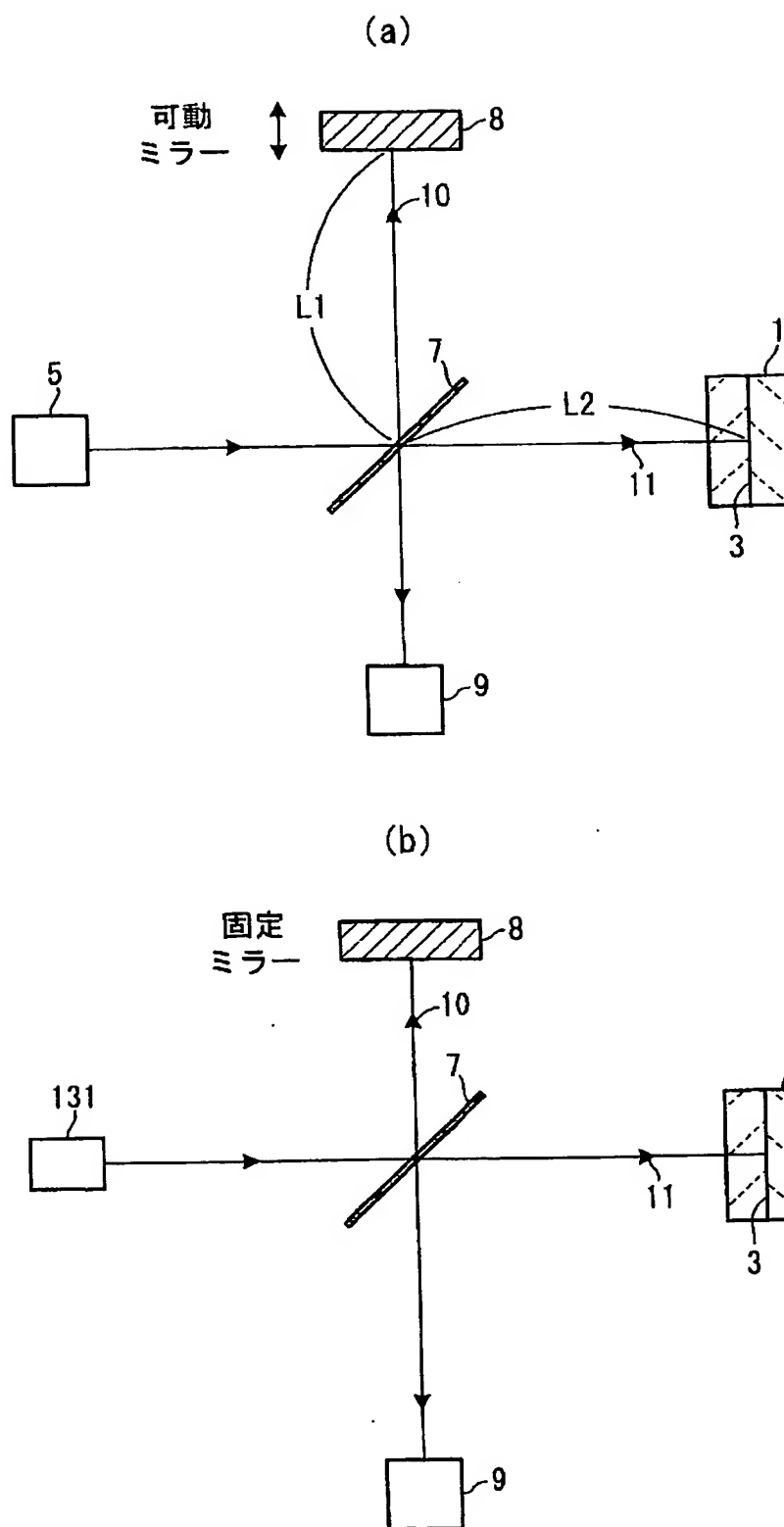
【図 9】



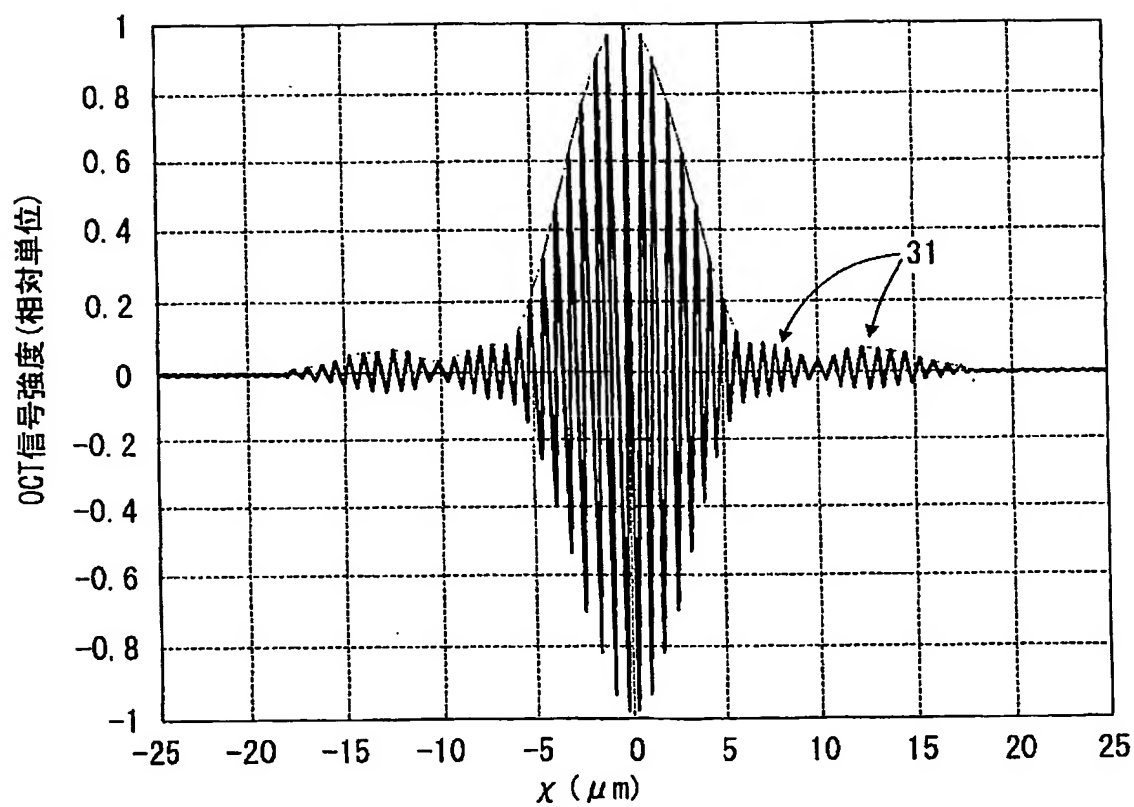
【図 10】



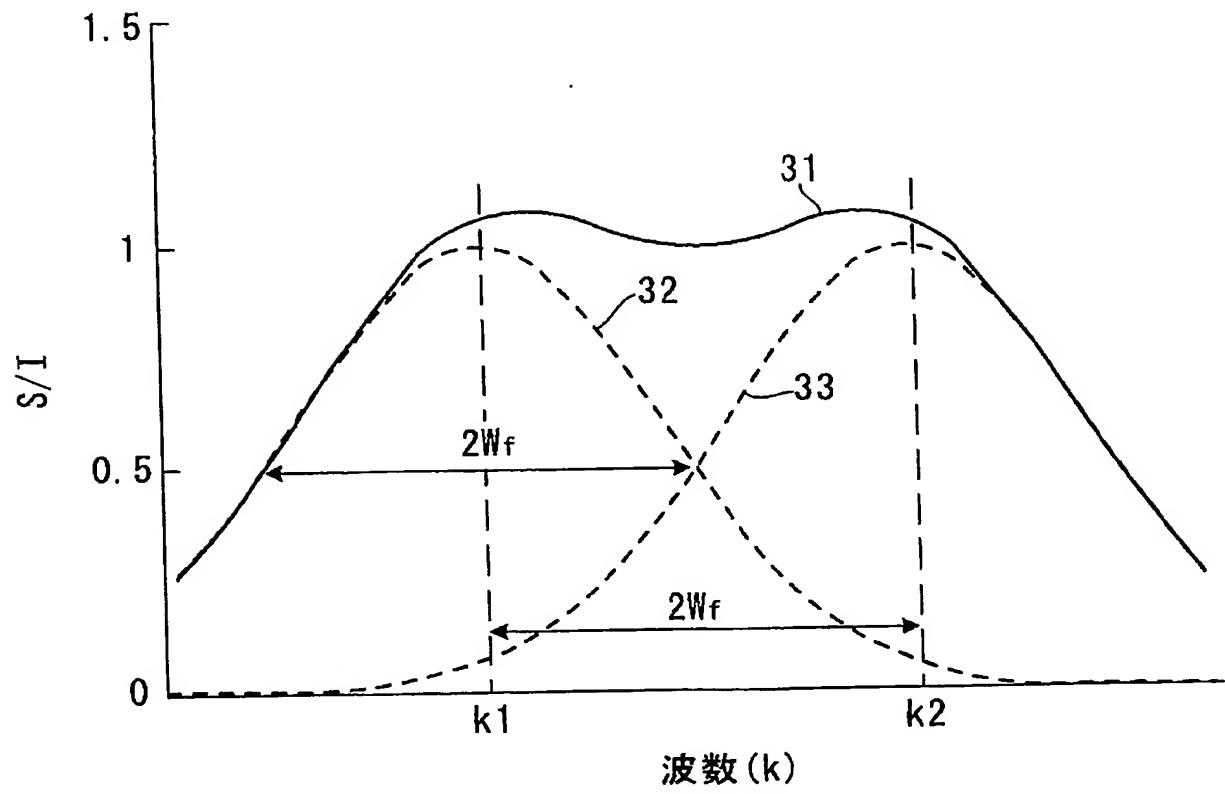
【図 11】



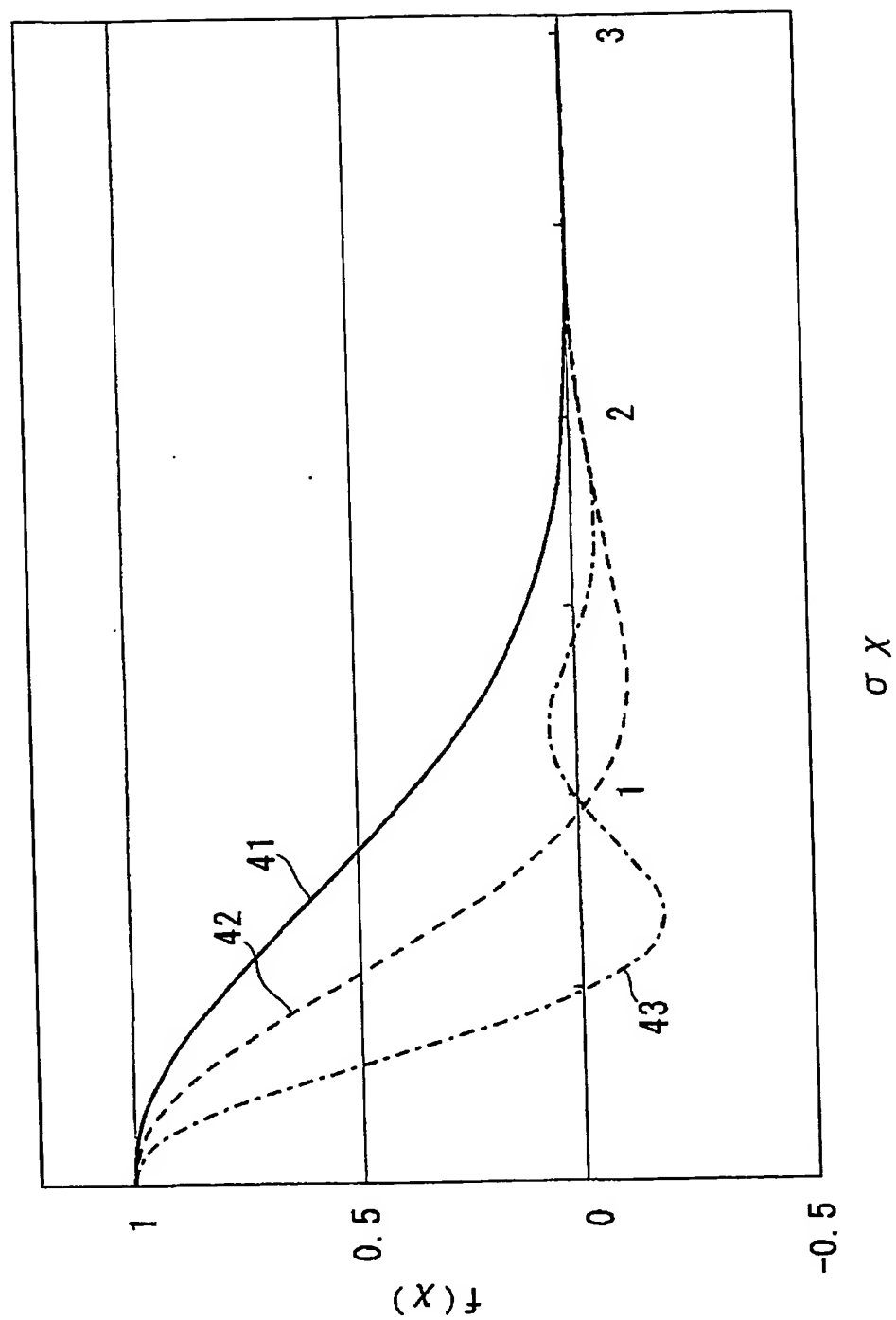
【図 12】



【図 13】



【図 14】



【書類名】要約書**【要約】**

【課題】 オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置において OCT 信号の分解能を向上させ、サイドロープの増大を防止することを課題とする。

【解決手段】 オプティカル・コヒーレント・トモグラフィー装置の光源として、波数掃引範囲の異なる複数の可変波長光源 41 の出力を合わせて出力する発光部 43 と、前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源 41 の波数掃引範囲を超えた波数掃引を可能にする制御装置 44 とを有してなるスイッチ光源（可変波長光発生装置）131 を用いる。また、スイッチ光源（可変波長光発生装置）を、掃引波数の異なる複数の可変波長光源の出力を合わせて出力する発光部と、前記可変波長光源を一つずつ掃引することによって個々の可変波長光源の出力可能波数を互いに補うように波数掃引を可能にする制御装置とを有してなる構成とする。

【選択図】 図 2



特願 2004-202957

出願人履歴情報

識別番号

[000004226]

1. 変更年月日
[変更理由]
住所
氏名

1999年 7月15日
住所変更
東京都千代田区大手町二丁目3番1号
日本電信電話株式会社

特願 2004-202957

出願人履歴情報

識別番号

[598041566]

1. 変更年月日

1998年 3月30日

[変更理由]

新規登録

住所

東京都港区白金5丁目9番1号

氏名

学校法人北里学園

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☒ FADED TEXT OR DRAWING

☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☒ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.